Journal of Ecohydrology
Online ISSN: 2423-6101
University of Tehran Press
Home Page: https://ije.ut.ac.ir

Assessment of Surface Water Distribution Process Performance Based on Localized Indicators of the Water-Food-Energy Nexus: A Case Study of the Nekoabad Irrigation Network in Isfahan

Dorsa Rahparast[1], Seyed Mehdy Hashemy Shahdany[2], Abbas Roozbahani[3]

1. M.Sc Graduate, Dept. of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: dorsa.rahparast@ut.ac.ir
2. Associate Professor, Dept. of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mehdi.hashemy@ut.ac.ir
3. Associate Professor, Dept. of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: roozbahany@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: September 15, 2024
Received in revised form: October 3, 2024
Accepted: December 13, 2024
Available online: December 21, 2024

Keywords:
Productivity,
Hydraulic Simulation,
Food-Energy-Water Nexus,
Drought,
Agricultural Water Management.

ABSTRACT

Objective: The main objective of this study is to assess and analyze the performance of the existing operation system under various operation scenarios and to examine the water and energy productivity in the agricultural units.

Method: In the first step, the surface water distribution was simulated using the existing operation system under different operation scenarios. Then, spatial evaluation of surface water distribution and the calculation of groundwater extraction in 459 agricultural units were carried out. Finally, the performance of the surface water distribution process was evaluated based on the localized indicators.

Results: The results showed that under normal operation conditions, only 43 agricultural units (9% of the network area) had surface water productivity in the good range. In contrast, 436 agricultural units (94% of the network area) had low energy productivity. Furthermore, the carbon production index indicated higher emissions in 292 agricultural units out of the total 459 units.

Conclusions: The findings of the study revealed that, with increased water scarcity in the second operation scenario, the situation deteriorated significantly in all indicators. These results highlight the urgent need to improve and enhance the efficiency of the operation system and alternative methods of surface water distribution within these units.

Cite this article: Rahparast, D., Hashemy Shahdany, M., Roozbahani, A. (2024). Assessment of Surface Water Distribution Process Performance Based on Localized Indicators of the Water-Food-Energy Nexus: A Case Study of the Nekoabad Irrigation Network in Isfahan. *Journal of Ecohydrology*, 11 (4), 495-510. https://doi.org/10.22059/IJE.2025.385613.1850

© Dorsa Rahparast, Seyed Mehdy Hashemy Shahdany, Abbas Roozbahani.
Publisher: University of Tehran Press. DOI: https://doi.org/10.22059/IJE.2025.385613.1850

Introduction

The present study evaluates the performance of the irrigation network operation system of Nekuabad in Isfahan based on localized indicators of the water-food-energy nexus. The use of these indicators, based on the relationships introduced in previous studies, does not allow for an independent evaluation of the contribution of surface water to the food production process and, consequently, does not enable an assessment of the performance of surface water distribution among water rights holders within an irrigation network. The overall objective of this research is to comprehensively evaluate the performance of the Nekuabad irrigation network operation system, taking into account the one-way interaction between the two components of water and energy, and based on localized water and energy evaluation indicators for use within the confines of the irrigation network. It is worth mentioning that the indicators related to the two components of water and energy utilized in various studies concerning the water-food-energy nexus at the level of countries or watersheds, when applied within the irrigation networks of Iran, will not yield accurate results.

Material and Methods

In this regard, the steps taken to conduct this research can be summarized as follows: Step One) Development of hydraulic flow simulation models in the main and secondary channels of the Nikabad irrigation network using the Integrator-Delay method in MATLAB, followed by calibration and validation of the developed models; Step Two) Simulation of hydraulic flow in the main and secondary channels of surface water distribution based on selected operational scenarios; Step Three) Spatial analysis of the surface water distribution process differentiated by operational scenarios and groundwater extraction differentiated by operational wells in a GIS environment, aiming to accurately determine the contribution of surface and groundwater for each of the 459 agricultural regions; and Step Four) Calculation and spatial analysis of localized water-energy linkage indicators.

Results and Discussion

The temporal-spatial analysis of the simulation results regarding the surface water distribution situation expressed as the surface water delivery index, revealed that not only was the situation unsatisfactory during normal operational conditions (where the amount of water diverted at the diversion dam equaled the total agricultural water demand of the entire irrigation network), but this situation is also assessed as completely unreliable in times of intensified water scarcity. The average surface water delivery index under normal scenarios was approximately 63%. In contrast, during intensified water scarcity, it dropped to about 30%, considered weak and unacceptable regarding surface water distribution adequacy. This situation has led to about 350 out of 459 agricultural units, covering 78% of the network area, being categorized as having weak surface water productivity with a range of (0.01 and 0.49) Kg/M3. With intensified water scarcity, this situation worsened, such that apart from one agricultural unit categorized as average, the other 450 units, covering approximately 99.7% of the network area, fell into the low surface water productivity category with a range of (0.01, 0.44) Kg/M3. Therefore, from the perspective of water indicators, the system's operational performance can be seriously questioned. This issue is also confirmed concerning the two energy indicators (consumption and energy efficiency indexes). The energy efficiency situation was even more disappointing; under normal operational scenarios, 436 agricultural units (approximately 94% of the network area) had an EP index with a range of (0.16, 0.19) Kg/KWh, classified as low energy efficiency. Under the low-water operation scenario, aside from one average agricultural unit, the other 458 units, covering about 99.7% of the network area, fell within the low energy efficiency category with a range of (0.03, 0.06) Kg/KWh. Similarly, the carbon production index values indicated higher emission levels in 292 agricultural units out of 495.

Conclusion

Therefore, based on the results obtained in this research, the performance of the Nekoabad irrigation network operation system can be questioned, and the distribution of surface water among the water rights holders can be considered unsatisfactory. Therefore, developing modern operational systems, including automatic control systems, or generally removing open channels used for the transmission

and distribution of surface water and replacing them with a pipeline network is suggested as a modernization option for irrigation networks. The use of localized indicators in this research could provide a framework for the accurate assessment of automation, renewal, improvement, and modernization.

Authors Contributions
DR: Investigation, Methodology, Software, Modeling & Simulation, Formal analysis, Writing—original draft. - **SMHS:** Conceptualization, Supervision, Validation, Writing—Review & Editing. – **AR:** Conceptualization, Supervision, Validation, Writing—Review & Editing.

Data Availability Statement
Data available on request from the authors.

Acknowledgments
The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations
The authors avoided from data fabrication and falsification.

Funding
This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of interest
The authors declare no conflict of interest.

مجله اکوهیدرولوژی
انتشارات دانشگاه تهران
شاپای الکترونیکی: ۶۱۰۱-۲۴۲۳
سایت نشریه: https://ije.ut.ac.ir

ارزیابی عملکرد فرایند توزیع آب سطحی با بهره‌گیری از شاخص‌های بومی‌سازی‌شدهٔ پیوند آب–غذا–انرژی (مطالعهٔ موردی: شبکهٔ آبیاری نکوآباد اصفهان)

درسا رهپرست،[۱] سید مهدی هاشمی شاهدانی،[۲*] عباس روزبهانی[۳]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران. رایانامه: dorsa.rahparast@ut.ac.ir
۲. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mehdi.hashemy@ut.ac.ir
۳. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: roozbahany@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۳
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱

کلیدواژه‌ها:
بهره‌وری،
شبیه‌سازی هیدرولیکی،
پیوند آب–غذا–انرژی،
خشکسالی،
مدیریت آب کشاورزی.

چکیده

موضوع: مطالعهٔ حاضر به ارزیابی عملکرد سامانهٔ بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری نکوآباد اصفهان پرداخته است، با تمرکز بر شاخص‌های بومی‌سازی پیوند آب–غذا–انرژی.

هدف: هدف اصلی این مطالعه ارزیابی و تحلیل عملکرد سامانه‌ی بهره‌برداری موجود تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری و بررسی وضعیت بهره‌وری آب و انرژی در واحدهای زراعی است.

روش تحقیق: در گام اول، شبیه‌سازی توزیع آب سطحی با استفاده از سامانه‌ی بهره‌برداری موجود تحت سناریوهای بهره‌برداری مختلف انجام شد. سپس، ارزیابی مکانی توزیع آب سطحی و محاسبه میزان آب زیرزمینی برداشت‌شده به تفکیک ۴۵۹ واحد زراعی صورت گرفت. در نهایت، عملکرد فرایند توزیع آب سطحی با تفکیک شاخص‌های بومی‌سازی‌شده مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در وضعیت بهره‌برداری نرمال، تنها در ۴۳ واحد زراعی (۹ درصد سطح شبکه) بهره‌وری آب سطحی در کلاس خوب قرار دارد. در حالی که در ۴۳۶ واحد زراعی (۹۴ درصد سطح شبکه) بهره‌وری انرژی پایین بود. همچنین، شاخص تولید کربن در ۲۹۲ واحد زراعی حاکی از انتشار بالای کربن بود.

نتیجه‌گیری: نتایج تحقیق نشان داد که با تشدید کم‌آبی در سناریوی بهره‌برداری دوم، وضعیت به‌طور چشمگیری در تمامی شاخص‌ها بدتر شده است. این نتایج حاکی از نیاز مبرم به بهبود و ارتقای کارایی سامانهٔ بهره‌برداری و شیوه‌های جایگزین توزیع آب سطحی در محدوده‌ی این واحدهاست.

استناد: رهپرست، درسا؛ هاشمی شاهدانی، سید مهدی؛ روزبهانی، عباس. ارزیابی عملکرد فرایند توزیع آب سطحی با بهره‌گیری از شاخص‌های بومی‌سازی‌شدهٔ پیوند آب–غذا–انرژی (مطالعهٔ موردی: شبکهٔ آبیاری نکوآباد اصفهان). *مجله اکوهیدرولوژی*، ۱۱(۴)، ۴۹۵-۵۱۰.
https://doi.org/10.22059/IJE.2025.385613.1850

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

© درسا رهپرست، سید مهدی هاشمی شاهدانی، عباس روزبهانی.

مقدمه

رشد جمعیت، توسعهٔ صنعتی و پیدایش سریع فناوری‌های جدید، روند تأمین و تقاضا از منابع تجدیدپذیر را تغییر داده است. در این میان، افزایش تقاضای آب برای مصارف شهری، کشاورزی و صنعتی، رقابت بر سر تخصیص منابع محدود آب را بین مناطق مختلف و بین انواع مصرف‌کنندگان تشدید کرده و با ظهور و تشدید دوره‌های کم‌آبی به‌دلیل تغییرات اقلیمی، چالش مذکور پیچیده‌تر شده است. از اثرات رقابت شدید بین بخش‌های مختلف در مصرف منابع مختلف می توان به عدم دسترسی قریب به ۱/۲ میلیارد نفر به برق، ۷۸۳ میلیون نفر به آب آشامیدنی و ۸۴۲ میلیون نفر به سبد غذایی مناسب اشاره کرد. در این راستا می‌توان به اهمیت مدیریت پایدار منابع آب، غذا و انرژی برای تأمین پایدار نیازهای جمعیت رو به رشد جهانی اشاره کرد. در این راستا و با هدف استفادهٔ بهینه و پایدار از منابع مذکور، رویکرد پیوند آب، انرژی و غذا تلاش نموده تا تعادل میان اهداف مختلف، منافع و نیازهای مردم و محیطزیست را براساس کمی‌سازی روابط آب، انرژی و غذا به‌صورت کمی ارائه و بررسی نماید. این مهم ازطریق به‌کارگیری شاخص‌های مختلف ارزیابی عملکرد (الگافی، ۲۰۱۷) و مدل‌سازی‌های کیفی و کمی در ابعاد مختلف و محدوده‌های مطالعاتی کوچک تا بزرگ‌مقیاس مختلف صورت گرفته است. با در نظر گرفتن هدف مذکور، تحقیقات متعددی با استفاده از رویکرد پیوند آب–غذا–انرژی در بخش مدیریت منابع در بخش کشاورزی صورت گرفته است. لازم به توضیح است که با توجه به اندرکنش درونی اجزای آب، غذا و انرژی در این مقوله، مطالعات مختلف در سطوح متفاوت با در نظر گرفتن اندرکنش‌های دوطرفه یا یک‌طرفه بین سه جزء مذکور انجام شده است. همچنین با یک تقسیم بندی کلی می توان مجموعهٔ مطالعات انجام‌شده را در مقیاس مدیریت آب آبیاری در داخل مزرعه و مدیریت آب در خارج از مزرعه (در سامانه های تأمین، توزیع و تحویل آب کشاورزی) تفکیک نمود. شایان ذکر است که عمده مطالعات مذکور مربوط به دستهٔ اول است. شایان ذکر است که ارتقای مدیریت آب کشاورزی در مقیاس خارج از مزرعه با هدف افزایش بهره‌وری آب در سامانه‌های انتقال، توزیع و تحویل آب کشاورزی در محدودهٔ شبکه‌های آبیاری ایران ضروری است. لذا با توجه به توضیحات فوق و در نظر گرفتن عدم امکان اجرایی‌سازی راهکارهای تأمین محور آب کشاورزی، به‌دلیل تشدید دوره‌های کم‌آبی، ارزیابی و ارتقای عملکرد سامانه‌های بهره‌برداری توزیع آب سطحی، به‌عنوان راهکارهای مؤثر مدیریت پایدار منابع آب تقاضامحور، در اولویت قرار گرفته است. کاهش تلفات در سامانه‌های بهره‌برداری، بهبود فرایند توزیع و تحویل عادلانه، کاهش وابستگی کشاورزان واقع در محدودهٔ شبکه‌های آبیاری به منابع آب زیرزمینی و به تبع آن، کاهش آسیب‌پذیری آبخوان‌ها، کاهش مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ و درنهایت کاهش تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌تواند از منافع آن به شمار آید.

با توجه به موارد فوق، هدف کلی پژوهش حاضر عبارت است از ارزیابی عملکرد سامانهٔ بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری نکوآباد اصفهان. ارزیابی صورت‌گرفته با در نظر گرفتن اندرکنش یک‌طرفه بین دو جزء آب و انرژی و بر پایهٔ شاخص‌های ارزیابی آب و انرژی بومی‌سازی‌شده برای استفاده در محدودهٔ شبکهٔ آبیاری است. شایان ذکر است که شاخص‌های مرتبط با دو جزء آب و انرژی استفاده‌شده در مطالعات مختلف صورت‌گرفته با موضوع پیوند آب–غذا–انرژی در سطح کشورها و یا حوضه‌های آبریز، درصورتی‌که در محدودهٔ شبکه‌های آبیاری ایران به کار گرفته شوند، منجر به نتایج دقیقی نخواهند شد. دلیل این امر، عدم تفکیک منابع تأمین آب کشاورزی (سطحی و زیرزمینی) در محاسبهٔ میزان مصرف آب و انرژی به تفکیک هر ناحیهٔ زراعی است. لازم به شفاف‌سازی است که دقت استفاده از شاخص‌های مذکور در مناطق کشاورزی خارج از محدودهٔ شبکه‌های آبیاری و همچنین مزارع مطالعاتی و تحقیقاتی به قوت خود باقی است. با در نظر گرفتن توضیحات ارائه‌شده، اهداف فرعی در نظر گرفته‌شده برای این پژوهش عبارت‌اند از: هدف اول، شبیه‌سازی وضعیت کنونی توزیع آب سطحی در سامانهٔ بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری نکوآباد اصفهان تحت سناریوهای بهره‌برداری غالب؛ هدف دوم، ارزیابی مکانی توزیع آب سطحی و برآورد میزان آب زیرزمینی برداشت‌شده به تفکیک واحدهای زراعی درجه‌سه در سطح شبکه؛ هدف سوم: ارزیابی جامع عملکرد مدیریت آب و انرژی به تفکیک واحدهای زراعی با به‌کارگیری شاخص‌های پیوند آب–انرژی بومی‌سازی‌شده برای استفاده در یک شبکهٔ آبیاری ایران (شامل شاخص تحویل آب سطحی، شاخص مصرف انرژی، شاخص بهره‌وری آب سطحی، شاخص بهره‌وری انرژی و شاخص تولید کربن). نوآوری تحقیق حاضر، عبارت است از ارزیابی عملکرد سامانهٔ بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری نکوآباد اصفهان بر پایهٔ شاخص‌های پیوند آب–انرژی.

پیشینهٔ پژوهش

عمده مطالعات صورت‌گرفته درزمینهٔ به‌کارگیری روش ارزیابی مبتنی‌بر پیوند آب–غذا–انرژی با هدف ارزیابی سامانه‌های آبیاری موجود در مقیاس مزرعه و ارائهٔ گزینه‌های ارتقای عملکرد (مک‌گرن و همکاران، ۲۰۱۹؛ فابیانی و همکاران، ۲۰۲۰؛ سیسیلیانو، رولی و دی اودوریکو، ۲۰۱۷) و توسعه و بومی‌سازی روش‌های کشاورزی دقیق (دل‌بورگی و همکاران، ۲۰۲۲؛ کارانیسا و همکاران، ۲۰۲۲؛ پریهر و همکاران، ۲۰۲۲؛ کامپانا و همکاران، ۲۰۱۸) صورت گرفته است. در این ارتباط، دامنهٔ وسیعی از شاخص‌های ارزیابی عملکرد شامل شاخص مصرف آب و انرژی، بهره‌وری آب و انرژی، بهره‌وری اقتصادی آب، غذا و انرژی در مطالعات ارزیابی مبتنی‌بر پیوند آب–غذا–انرژی با هدف ارتقای مدیریت آب در مزرعه، توسعه و به کار گرفته شد (الگافی، ۲۰۱۷). در ادامه، مطالعات متنوعی با هدف تخصیص بهینهٔ منابع در بخش کشاورزی در سطح حوضهٔ آبریز بر پایهٔ به‌کارگیری شاخص‌های مذکور انجام شد؛ برای مثال، توسعهٔ چارچوب تخصیص بهینهٔ منابع آب و زمین در بالادست حوزهٔ آبریز نیل برای به حداقل رساندن استفاده از منابع آب و تخصیص بهینهٔ آب کشاورزی بر پایهٔ مدل بهینه‌سازی (عالم و همکاران، ۲۰۱۹)، توسعهٔ مدل تصمیم‌گیری برای مدیران و برنامه‌ریزان با هدف استفادهٔ بهینه از منابع آب، انرژی و زمین‌های کشاورزی ضمن به حداکثر رساندن منافع اقتصادی کشاورزان و حداقل نمودن تأثیرات مخرب زیست‌محیطی در یک حوضهٔ آبریز در کشور چین (نامانی و همکاران، ۲۰۱۹) و توسعهٔ مدل کشاورزی پایدار منطقهٔ آبیاری چمنگوان چین را براساس پیوند آب، غذا و انرژی با قابلیت ارزیابی زمانی کشاورزی پایدار و رصد زمانی مصرف منابع آب و انرژی در آبیاری (لیو و همکاران، ۲۰۱۹) نمونه‌ای از موارد متعدد به‌کارگیری شاخص‌های آب‌محور، انرژی‌محور و اقتصادی‌محور در مطالعات ارزیابی مبتنی‌بر پیوند آب–غذا–انرژی هستند. مطالعات انجام‌شده در ارتباط با ارزیابی عملکرد سامانه‌های بهره‌برداری در شبکه‌های آبیاری حاکی از عملکرد ضعیف سامانه در توزیع کافی، عادلانه، بموقع و مطابق نیاز آب سطحی به ذی‌نفعان (گومز– لیمون و همکاران، ۲۰۲۱؛ کولاس و بایگ، ۲۰۲۰) در شبکه‌ها و همچنین تلفات قابل توجه در سامانه‌های انتقال و توزیع (شارو و همکاران، ۲۰۲۰) بوده است. واکنش مستقیم کشاورزان به نارسایی‌های مذکور، اقبال به اخذ مجوز حفر چاه کشاورزی بوده که این روند پس از تشدید دوره‌های کم‌آبی سی سال گذشته در ایران روند فزاینده‌ای گرفته است (بیات، روزبهانی و هاشمی شاهدانی، ۱۴۰۱). ابزار مورد استفاده در این ارتباط مدل‌های شبیه‌ساز هیدرولیک جریان هستند که قادر به شبیه‌سازی نحوهٔ توزیع آب سطحی در مقیاس‌های زمانی مختلف‌اند. در ادامه، شاخص‌های ارزیابی عملکرد، اقدام به ارزیابی زمانی و مکانی نحوهٔ توزیع آب در سطح شبکه می‌کنند. در این ارتباط، مدل‌های هیدرولیکی مختلفی با در نظر گرفتن اهداف اصلی تحقیق، توسط محققان مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با هدف ارائهٔ یک سیستم هوشمند شبیه‌سازی هیدرولیکی و ارزیابی عملکرد سیستم‌های توزیع و تحویل آب کشاورزی که قابلیت جایگزینی با مدل‌های تجاری مانند HEC-RAS و SOBEK را داشته باشد، اقدام به توسعهٔ یک مدل هوشمند توزیع آب کشاورزی با استفاده از شبکه‌های ترکیبی بیزین[1] شد (کاغذچی، هاشمی شاهدانی و روزبهانی، ۱۳۹۹). با هدف بهبود عملکرد هیدرولیکی به‌واسطهٔ بهره‌برداری مؤثر، جریان در کانال اصلی شبکهٔ آبیاری ماهاترا[2] در کشور اتیوپی با استفاده از مدل DUFLOW شبیه‌سازی شد و با به‌کارگیری شاخص‌های ارزیابی عملکرد سامانهٔ بهره‌برداری، روش‌های بهبود عملکرد مورد ارزیابی قرار گرفت (دجن، ۲۰۱۵). سولر و همکاران در سال ۲۰۱۵، مدل HEC-RAS را برای شبیه‌سازی جریان در کانال‌های اصلی یک شبکهٔ آبیاری در اسپانیا انتخاب کردند و توانایی سامانهٔ بهره‌برداری موجود و گزینه‌های مدرن‌سازی در کاهش اختلالات ناشی از تغییرات دبی پمپاژ ورودی را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. جمع‌بندی بخش اول پیشینهٔ تحقیق به این صورت است که مطالعات ارزیابی مبتنی‌بر پیوند آب–انرژی–غذا عمدتاً در اشل مزرعه صورت گرفته، بنابراین توسعهٔ آن در مقیاس خارج از مزرعه با هدف افزایش بهره‌وری آب در سامانه‌های بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری ضروری است. همچنین جمع‌بندی بخش دوم پیشینهٔ تحقیق حاکی از آن است که توسعهٔ مدل‌های هیدرودینامیک ابزاری مناسب برای توسعهٔ پیوند مذکور در اشل سامانه‌های بهره‌برداری است. بر این اساس، هدف اصلی این تحقیق، توسعهٔ روش ارزیابی مبتنی‌بر پیوند آب–انرژی برای بررسی کارایی سامانهٔ

1. Bayesian
2. Mahatra

بهره‌برداری یک شبکهٔ آبیاری است. نوآوری تحقیق نیز به‌کارگیری این روش ارزیابی برای بررسی عملکرد سامانهٔ بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری نکوآباد اصفهان است.

روش‌شناسی پژوهش

شبکهٔ آبیاری و زهکشی نکوآباد اصفهان

شبکهٔ آبیاری نکوآباد (شکل ۱)، واقع در حوضهٔ آبریز زاینده‌رود، در منطقهٔ مرکزی ایران قرار گرفته است. براساس اطلاعات و آمار جمع‌آوری‌شده در مرحلهٔ ابتدایی، انجام این تحقیق از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان اطلاعات شبکه به شرح ذیل ارائه می‌گردد:
مساحت درحال بهره‌برداری شبکه در حدود ۲۹ هزار هکتار است و موقعیت مکانی آن در عرض جغرافیایی ۳۲:۲۳ تا ۳۱:۴۶ شمالی و طول جغرافیایی ۵۱:۲۱ تا ۵۱:۴۲ شرقی قرار گرفته است. میانگین بارندگی سالانه در این منطقه ۱۲۰ میلی‌متر است که این میزان بسیار کمتر از متوسط بارندگی سالانه در ایران، در حدود ۲۴۰ میلی‌متر است. این درحالی است که میزان تبخیر و تعرق در این منطقه حدود ۱۵۰۰ میلی‌متر در سال برآورد شده است. منبع اصلی تأمین‌کنندهٔ آب این شبکهٔ آبیاری، آب رهاشده از سد زاینده‌رود است. در طرفین بند انحرافی نکوآباد، در منشأ تأمین آب این شبکهٔ آبیاری، دو رشته کانال اصلی چپ و راست به‌منظور برداشت آب برای تحت پوشش قرار دادن اراضی احداث شده است. کنترل و تنظیم سطح آب به‌شیوهٔ کنترل بالادست، با به‌کارگیری ۵۰ سازهٔ خودکار هیدرومکانیکال آمیل و یک سازهٔ ثابت Duck-Bill صورت می‌گیرد. تحویل و توزیع سطح آب در طول شبکهٔ اصلی، متشکل از کانال‌های درجه‌یک و درجه‌دو، به‌ترتیب ۱۳ و ۱۴۹ سازهٔ آبگیر انجام می‌گیرد که نحوهٔ تنظیمات آن به‌صورت دستی و توسط اپراتور انجام می‌شود.

شبیه‌سازی توزیع و تحویل آب در کانال آبیاری

در این پژوهش برای شبیه‌سازی هیدرولیک جریان از مدل ریاضی انتگرالی-تأخیری (ID) در محیط نرم‌افزار MATLAB استفاده شد تا امکان تبادل اطلاعات با برنامه‌های زمانی تغییر بازشدگی دریچه‌های آبگیر (برنامه‌ریزی روزانهٔ تحویل و توزیع آب) امکان‌پذیر شود. در مدل مذکور، هر بازه کانال اصلی سامانهٔ توزیع آب به دو بخش، شامل i- بخش جریان یکنواخت و ii- بخش منحنی برگشت آب است. زمان تأخیر تنها پارامتری است که در بخش جریان یکنواخت، برای تشریح جریان در نظر گرفته می‌شود. معادلهٔ حاکم بر این بخش به‌صورت رابطهٔ (۱) ارائه می‌شود (بیات، روزبهانی و هاشمی شاهدانی، ۲۰۲۲):

$$q_{canal}(t) = q_{in}(t-\tau) \quad \text{رابطهٔ ۱)}$$

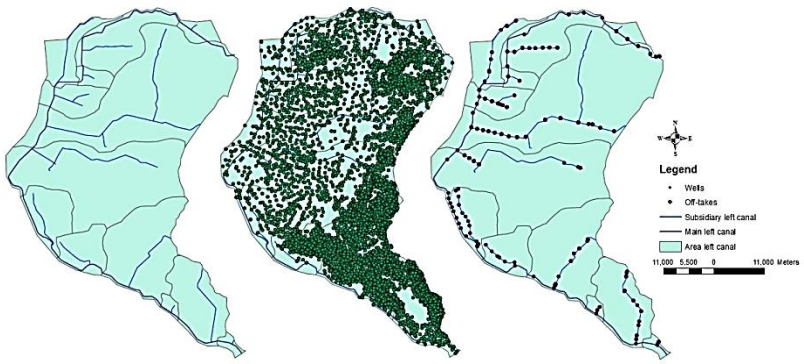
که در آن، q_{in} دبی ورودی به بخش یکنواخت جریان (m^3/s)، q_{canal} دبی ورودی به بخش ذخیره (m^3/s)، t زمان (sec) و τ زمان تأخیر (sec) است. بخش منحنی برگشت آب (بخش دوم) مانند یک مخزن عمل می‌کند و بخش انتگرالی مدل را شامل می‌شود. تغییرات مساحت سطح افقی آب در ترازهای مختلف مخزن (A_s) براساس دبی‌های ورودی و خروجی از بازهٔ کانال به‌صورت رابطهٔ (۲)، در حوزهٔ زمان و حوزهٔ فرکانس، قابل بیان است:

رابطهٔ ۲)

$$A_s \cdot \frac{dh(t)}{dt} = q_{canal}(t) - q_{out}(t)$$

$$A_s \cdot s \cdot h(s) = q_{canal}(s) - q_{out}(s) \Leftrightarrow h(s) = \frac{1}{A_s \cdot s} \cdot [q_{canal}(s) - q_{out}(s)]$$

که در آن، A_s مساحت سطح ذخیره (m^2)، h عمق آب و (m)، q_{out} دبی خروجی از بخش منحنی برگشت آب (m^3/s) است.



شکل ۱. محدودهٔ مورد مطالعهٔ این پژوهش شامل سیزده واحد زراعی درجه‌دو، کانال‌ها و آبگیرهای توزیع آب سطحی، چاه‌های بهره‌برداری مجوزدار در سطح شبکهٔ نکوآباد است.

سامانه‌های بهره‌برداری دستی شبکهٔ آبیاری نکوآباد

مدل سامانهٔ بهره‌برداری این شبکه براساس روش تناسبی (P) در محیط متلب توسعه و با مدل شبیه‌ساز برابر شد. لازم به توضیح است که روش کنترل تناسبی در واقع المان اول کنترلگر تناسبی- انتگرالی (PI) است که از پرکاربردترین روش‌های کنترل کلاسیک در صنایع مختلف به شمار می‌آید. براساس الگوریتم کنترل P، تغییرات دبی عبوری از زیرسازه‌های تنظیم به‌صورت رابط/ (۳) قابل محاسبه است:

$$\Delta Q(k) = K_p.[e(k) - e(k-1)]$$ رابطهٔ ۳)

در رابطهٔ فوق $\Delta Q_{(k)}$ مقدار تغییرات دبی عبوری از سازه‌های تنظیم برحسب متر مکعب بر ثانیه در گام زمانی جاری، e برابر مقدار انحرافات تراز سطح آب از رقوم هدف، اندیس‌های k و $k-1$ به‌ترتیب نشانگر گام زمانی جاری و گام زمانی قبلی و K_p برابر ضریب تناسبی است.

شاخص‌های ارزیابی پیوند آب–غذا–انرژی

روند انتخاب شاخص‌های ارزیابی در این پژوهش با تبعیت از مطالعات اصلی مربوط، که در بخش پیشینهٔ تحقیق به آن‌ها اشاره شد، صورت گرفت. در این ارتباط می‌توان به دو مقالهٔ اصلی که با هدف توسعهٔ روش ارزیابی مبتنی‌بر پیوند آب–غذا–انرژی در محدودهٔ مزرعه (الگافی، ۲۰۱۷) و در محدودهٔ سامانهٔ بهره‌برداری (بیات، روزبهانی و هاشمی شاهدانی، ۲۰۲۲) یک شبکهٔ آبیاری انجام شده است، اشاره کرد. همچنین لازم به توضیح است که انتخاب شاخص‌های ارزیابی مذکور براساس اهمیت آن‌ها در تحلیل پیوندهای میان دو منبع آب و انرژی در تولید غذا صورت گرفته است. شاخص‌های مصرف آب/انرژی و بهره‌وری آب/انرژی به‌دلیل ارتباط مستقیم آن‌ها با فرایند کشاورزی و امکان ارزیابی دقیق عملکرد سامانهٔ بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری در افزایش یا کاهش مصرف این دو منبع انتخاب شده‌اند؛ برای مثال، افزایش بهره‌وری آب می‌تواند منجر به کاهش مصرف منابع آب شود، که این خود تأثیر مثبتی بر امنیت غذایی خواهد داشت. ارتباطات بین این شاخص‌ها، شامل تأثیرات مثبت و منفی آن‌ها بر یکدیگر، در ماهیت درونی شاخص‌ها نهفته و قابل کمی‌سازی نیز هست. برای مثال افزایش مصرف آب به‌طور مستقیم بر تولید بیشتر محصولات کشاورزی و متعاقباً بهبود شاخص بهره‌وری آب تأثیر می‌گذارد، درعین‌حال افزایش مصرف انرژی را نیز در بر دارد. لذا در این مقاله سعی شد با کمی‌سازی نتایج ارزیابی و سپس دسته‌بندی کیفی (خوب، متوسط، ضعیف) هرکدام از شاخص‌های ارزیابی، که در ادامه معرفی شده‌اند، امکان بررسی دوبه‌دوی شاخص‌ها فراهم گردد.

شاخص تحویل آب سطحی: رابطهٔ (۴) که به‌عنوان شاخص کفایت توزیع آب سطحی نیز شناخته می‌شود، برای این منظور استفاده شد:

$$P_A = \frac{1}{T}\sum_{T}[\frac{1}{R}\sum_{R}(P_a)];\ P_a = \frac{Q_d}{Q_r}\ \ if\ Q_d < Q_r\ \ \ Otherwise\ P_a = 1$$ رابطهٔ ۴)

که در آن، P_A شاخص کفایت توزیع آب (درصد)، T مدت‌زمان بهره‌برداری (sec)، R تعداد کل آبگیری‌های واقع در کانال اصلی، Q_D دبی تحویلی به هر آبگیر و Q_R دبی تقاضای آب کشاورزی (m^3/s) است. هرچه مقدار شاخص کفایت به ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر شود، مقدار مطلوب آن رخ داده است. بااین‌حال، براساس طبقه‌بندی ارائه‌شده، از دیدگاه مدیریتی شاخص مذکور به سه دسته که بیانگر بهره‌برداری مطلوب ($P_A \in (90-100)$)، قابل قبول ($P_A \in (80-90)$) و ضعیف ($P_A \leq 80$) سامانهٔ توزیع آب می‌باشد، قابل تقسیم‌بندی است.

شاخص بهره‌وری آب سطحی : شاخص بهره‌وری آب سطحی به‌صورت رابطهٔ (۵) ارائه شده است:

رابطهٔ ۵) $$\text{بهره‌وری آب‌سطحی} = \frac{\text{سطح تحت پوشش آب سطحی } (ha) * \text{عدد عملکرد} (\frac{ton}{ha})}{\text{آب تقاضا شده برای هر واحد } (m3)}$$

لازم به توضیح است که با توجه به اینکه محدودهٔ مطالعاتی این پژوهش دربرگیرندهٔ سامانه‌های آبی خارج از مزرعه بوده و اصولاً بحث مدیریت آب در مزرعه در حوزهٔ این مقاله نیست، عدد عملکرد در این پژوهش ثابت بوده و ازطریق میانگین وزنی عملکرد محصولات الگوی کشت غالب به دست آمده است.

شاخص مصرف انرژی: بررسی انرژی این تحقیق محدود به محاسبه و برآورد انرژی مصرفی در محل چاه‌هاست که براساس رابطهٔ (۶) انجام شد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۱):

رابطهٔ ۶)

$$EC = \frac{2/73.D.V}{OPE.(1-TL).1000}$$

که در آن، EC کل انرژی مصرفی برحسب (kwh)، D ارتفاع استخراج (m)، V حجم استخراج (m^3)، OPE راندمان پمپ، TL تلفات انتقال و توزیع (فقط برای پمپ‌های الکتریکی صادق است و برای دیگر پمپ‌ها صفر است).

شاخص بهره‌وری انرژی: شاخص بهره‌وری انرژی به‌صورت رابطهٔ (۷) ارائه شده است:

رابطهٔ ۷) $$\text{بهره‌وری انرژی} = \frac{\text{سطح تحت پوشش آب سطحی } (ha) * \text{عدد عملکرد} (\frac{ton}{ha})}{\text{انرژی مصرف شده برای هر واحد } (kwh)}$$

مقدار انرژی این شاخص برای هر واحد ۸۰۰×۸۰۰ متر از شاخص مصرف انرژی به دست آمد.

شاخص تولید کربن: در این پژوهش تولید کربن، در ادامهٔ شاخص مصرف انرژی، در قالب رابطهٔ (۶) معرفی شده است که میزان کلی تولید کربن در فصل آبیاری را نشان می‌دهد. طبق توصیهٔ ارائه‌شده در منبع کریمی و همکاران (۱۳۹۱)، تولید یک کیلووات‌ساعت برق در ایران منجر به انتشار ۰/۶۲کیلوگرم کربن‌دی‌اکسید می‌شود؛ بنابراین شدت کربن الکتریسیته در استخراج آب‌های زیرزمینی ۰/۱۷ کیلوگرم کربن در کیلووات‌ساعت است.

یافته‌های پژوهش

سناریوهای بهره‌برداری: شرایط مرزی شبیه‌سازی هیدرولیک جریان

به‌منظور تعیین سناریوهای بهره‌برداری در تحقیق حاضر، تحلیل زمانی داده‌های تاریخی دبی تحویل داده‌شده در محل بند انحرافی نکوآباد انجام شد. در واقع، الگوهای متناوب دبی تأمین‌شده در محل بند انحراف استخراج و نمایندهٔ هر الگو به‌عنوان یکی از سناریوهای بهره‌برداری به‌عنوان شرط اولیهٔ شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل زمانی شامل سناریوهای منتخب بهره‌برداری به‌همراه احتمال وقوع رخداد هر کلاس در طول ۳۰ سال گذشته بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری نکوآباد (دورهٔ آماری ۱۳۷۰–۱۴۰۰) در دو دستهٔ ذیل تقسیم‌بندی می‌شود که این دو دسته بیشترین فراوانی وقوع را در ۳۰ سال گذشته داشته‌اند:

- سناریوی بهره‌برداری نرمال: دبی تحویلی در محل بند انحرافی در حدود ۱۰۰ تا ۱۱۰ درصد مجموع تقاضای برآوردشده، متوسط احتمال وقوع: ۲۰/۶ درصد
- سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی ۳۰ درصد: دبی تحویلی در محل بند انحرافی کمتر از ۷۰ تا ۷۵ درصد مجموع تقاضای برآورد شده، متوسط احتمال وقوع: ۳۰/۶ درصد

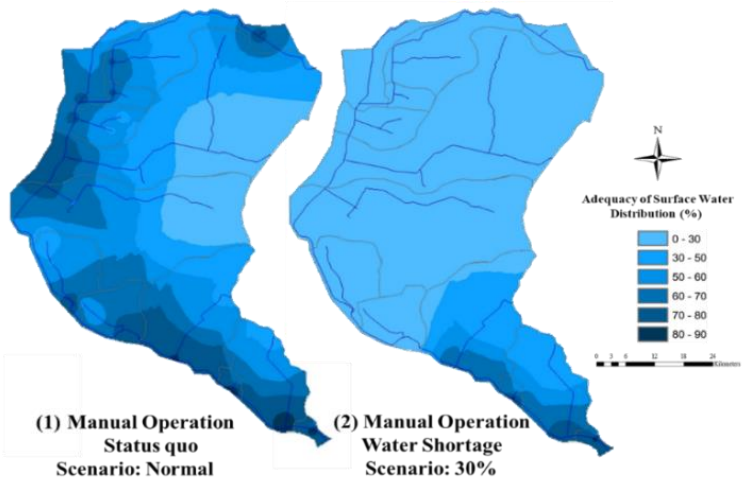
واسنجی و صحت‌سنجی مدل هیدرودینامیکی

واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز توسعه داده‌شدهٔ ID براساس اطلاعات اندازه‌گیری‌شده‌ای که توسط شرکت آب منطقه‌ای اصفهان جمع‌آوری شده بود، انجام شده است. این داده‌ها مربوط به سه دورهٔ بهره‌برداری ۵۳، ۶۵ و ۷۳ روزه در سال‌های آبی ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۱، ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۳ و ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۰ است. برای واسنجی مدل، ضریب دبی آبگذری سازه‌های آبگیر به‌عنوان متغیرهای قابل تغییر جهت انطباق مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر مشاهده‌ای استفاده شدند. بعد از واسنجی مدل و تنظیم پارامترهای آن، فرایند صحت‌سنجی اجرا شد. نتایج این فرایند به این صورت است که مقدار میانگین خطای مطلق (MAE)، برای دورهٔ واسنجی برابر ۰/۰۰۵ و برای دورهٔ صحت‌سنجی ۰/۰۰۹ مترمکعب بر ثانیه است. مقدار بهینهٔ این شاخص برابر صفر است، با توجه به اینکه مقادیر مذکور به مقدار بهینه نزدیک‌اند، می‌توان نتیجه گرفت که مدل دقت مناسبی ارائه می‌کند. شاخص ضریب خطای پسماند (CRM)، برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی، به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۸- و ۰/۰۱۶- هستند. با توجه به اینکه بهترین میزان برای CRM صفر است، مقادیر کم این شاخص حاکی از دقت قابل قبول مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی است. درنهایت، میزان ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE)، برای دورهٔ واسنجی برابر ۰/۰۰۷ و برای دورهٔ صحت‌سنجی ۰/۰۰۸ به دست آمدند. مقادیر مناسب این شاخص نیز دقت مدل را مورد تأیید قرار می‌دهد.

تحلیل شاخص‌های پیوند آب–انرژی

شاخص تحویل آب سطحی

به‌منظور ارائهٔ تحلیل مکانی کفایت توزیع آب در سطح شبکه، مقدار متوسط شاخص محاسبه‌شده با استفاده از نرم‌افزار GIS در شکل ۲، به تفکیک سناریوهای بهره‌برداری ارائه شد. نتایج تحلیل مکانی، امکان بررسی و مقایسهٔ مکانی پراکندگی مقادیر متوسط شاخص کفایت تحویل آب به آبگیرها تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری را فراهم نموده است. مطابق نقشهٔ پهنه‌بندی میانگین شاخص کفایت توزیع آب سطحی ارائه‌شده در شکل ۲، در همهٔ سناریوها، شاخص کفایت از بالادست (منطقهٔ نزدیک به بند انحرافی نکوآباد) به‌سمت پایین‌دست (انتهای کانال‌های اصلی و تخلیه به زهکش انتهایی) روندی نزولی را طی می‌کند. مقدار شاخص کفایت نشان‌داده‌شده در این شکل حاکی از این است که به‌طورکلی بهره‌برداری در امتداد کانال اصلی (بخش غربی شبکه) با مقادیر بالاتر، از مطلوبیت بیشتری برخوردار است و با فاصله از بخش غربی به بخش‌های مرکزی و شرقی شبکه، وضعیت کفایت توزیع آب غیرقابل قبول می‌شود.



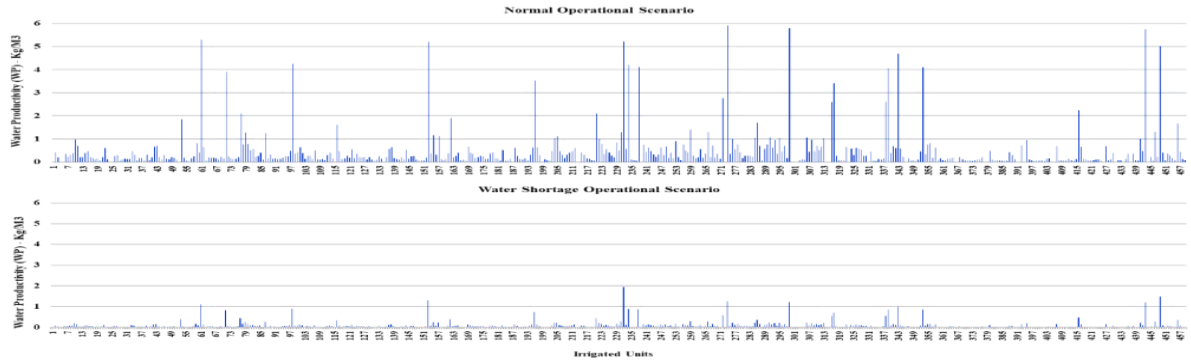
شکل ۲. تحلیل مکانی شبیه‌سازی فرایند توزیع آب سطحی تحت سناریوهای بهره‌برداری شامل نقشه‌های پراکندگی میانگین کفایت توزیع آب سطحی

شاخص بهره‌وری آب سطحی

مقادیر محاسبه‌شدهٔ شاخص بهره‌وری آب سطحی تحت دو سناریوی بهره‌برداری نرمال و کم‌آبی و به تفکیک ۴۵۹ واحد شبکهٔ آبیاری نکوآباد در شکل ۳ ارائه شده است.

در این تحقیق با بررسی منابع مختلف، طبقه‌بندی عمومی معرفی‌شده در گزارش‌های مرتبط، برای بررسی و تفسیر نتایج شاخص بهره‌وری آب استفاده گردید که براساس آن نتایج این شاخص در سه دستهٔ کلیِ بهره‌وری آب خوب ($EP>1.5\ Kg/M^3$)، بهره‌وری آب متوسط ($1.5>EP>0.5\ Kg/M^3$) و بهره‌وری آب بد ($EP<0.5\ Kg/M^3$)، قابل تقسیم و ارزیابی است. بر این اساس، تحلیل روند تغییرات شاخص بهره‌وری آب در واحدهای مذکور به شرح ذیل است:

- دستهٔ اول، بهره‌وری آب سطحی خوب: تحت سناریوی بهره‌برداری نرمال، در ۴۳ واحد زراعی شاخص WP با محدودهٔ تغییرات (۵/۹، ۱/۵) در دستهٔ خوب قرار گرفت. تحت سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی، تنها در ۳ واحد زراعی شاخص WP محدودهٔ تغییرات (Kg/M^3 (۱/۱،۵/۹) در دستهٔ بهره‌وری انرژی خوب قرار گرفت.
- دستهٔ دوم، بهره‌وری آب سطحی متوسط: تحت سناریوی بهره‌برداری نرمال، در ۶۶ واحد زراعی (در حدود ۱۴/۴ درصد از سطح شبکه) شاخص WP با محدودهٔ تغییرات (Kg/M^3 (۰/۹، ۰/۵) در دستهٔ بهره‌وری آب سطحی متوسط قرار گرفت. تحت سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی، در ۱۷ واحد زراعی شاخص WP با محدودهٔ تغییرات (Kg/M^3 (۰/۹، ۰/۴) در دستهٔ بهره‌وری آب سطحی متوسط قرار گرفت.
- دستهٔ سوم، بهره‌وری آب سطحی پایین: تحت سناریوی بهره‌برداری نرمال، در ۳۵۰ واحد زراعی شاخص WP با محدودهٔ تغییرات ۰/۴۹–۰/۰۱ Kg/M^3 در دستهٔ بهره‌وری آب سطحی پایین قرار گرفت. تحت سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی، ۴۳۹ واحد دیگر با محدودهٔ تغییرات ۰/۴۴–۰/۰۱ Kg/M^3 در دستهٔ بهره‌وری آب سطحی پایین قرار گرفت. روندی مشابه روند به‌دست‌آمده در EP (شکل ۶)، در ارتباط با WP (شکل ۳) نیز به دست آمده که به‌رغم اینکه اکثریت قریب‌به‌اتفاق واحدهای زراعی در هر دو سناریوی بهره‌برداری در دستهٔ WP ضعیف قرار گرفته است، با تشدید کم‌آبی در سناریوی بهره‌برداری دوم، کاهش چشمگیر WP در کل شبکهٔ آبیاری قابل ملاحظه است؛ به‌نحوی‌که میانگین شاخص WP در شرایط بهره‌برداری نرمال برای دسته‌های اول تا سوم به‌ترتیب برابر ۳/۹۶، ۰/۷۸ و ۰/۱۹ Kg/M^3 به دست آمده است، درحالی‌که در شرایط بهره‌برداری کم‌آبی مقادیر مذکور به‌ترتیب عبارت‌اند از: ۱/۵۷، ۰/۵۸ و ۰/۰۶ Kg/M^3.

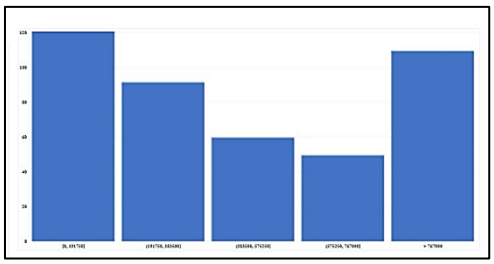


شکل ۳. نمودار شاخص بهره‌وری آب سطحی تحت سناریوهای بهره‌برداری نرمال و کم‌آبی

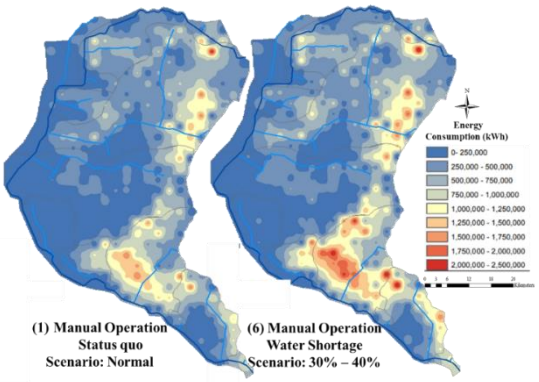
شاخص مصرف انرژی

همان‌طورکه پیش‌تر نیز توضیح داده شد، در این پژوهش، منطقهٔ مورد مطالعه به ۴۵۹ سلول ۸۰۰×۸۰۰ تقسیم شده و میزان مصرف انرژی هر سلول از جمع مصرف انرژی سالانهٔ تعداد چاه‌هایی است که در آن سلول قرار گرفته است. نتایج محاسبات شاخص مصرف انرژی در دو شکل ۴ و ۵ ارائه شده است. در شکل ۴، محور افقی نمودار بازه‌های مصرف انرژی را نمایش می‌دهد که به ۵ گروه تقسیم‌بندی شده و محور عمودی نمودار، تعداد سلول‌هایی را نشان می‌دهد که در این محدوده‌های مصرفی قرار گرفته‌اند. همان‌طور که از نمودار مشخص است، بیشترین تعداد سلول‌ها که حدود ۱۲۰ است، از بین ۴۵۹ سلول، برای بازهٔ مصرف انرژی بین ۰ تا

۱۹۱۷۵۰ کیلووات است و کمترین آن که حدود ۶۰ سلول است، بین حدود ۵۷۵ تا ۷۶۷ هزار کیلووات است. در شکل ۵ نیز نقشهٔ پهنه‌بندی‌شدهٔ شاخص مصرف انرژی نشان داده شده است.



شکل ۴. دسته‌بندی ۴۵۹ واحد زراعی واقع در شبکهٔ آبیاری نکوآباد در کلاس‌های مصرف انرژی



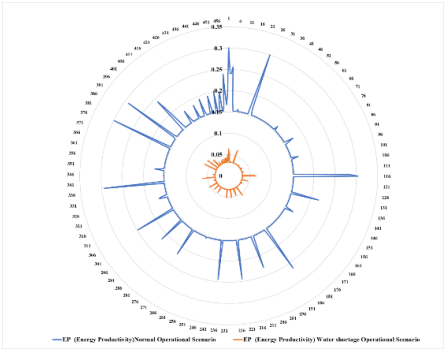
شکل ۵. تحلیل مکانی مصرف انرژی ناشی از پمپاژ آب از چاه‌های بهره‌برداری در سطح شبکهٔ آبیاری نکوآباد

شاخص بهره‌وری انرژی

مقادیر محاسبه‌شدهٔ شاخص بهره‌وری انرژی تحت دو سناریوی بهره‌برداری نرمال و کم‌آبی و به تفکیک ۴۵۹ واحد شبکهٔ آبیاری نکوآباد در شکل ۶ ارائه شده است. در این تحقیق با بررسی منابع مختلف، طبقه‌بندی عمومی معرفی‌شده برای بررسی و تفسیر نتایج شاخص بهره‌وری انرژی استفاده گردید که براساس آن نتایج این شاخص در سه دستهٔ کلی بهره‌وری انرژی بالا (EP>0.5 Kg/KWh)، بهره‌وری انرژی متوسط (Kg/KWh 0.3<EP<0.5) و بهره‌وری انرژی پایین (EP<0.3 Kg/KWh) قابل تقسیم و ارزیابی است. بر این اساس، تحلیل روند تغییرات شاخص بهره‌وری انرژی در واحدهای مذکور به شرح ذیل است:

- دستهٔ اول، بهره‌وری انرژی بالا: در هیچ‌یک از ۴۵۹ واحد زراعی ریزمقیاس‌نمایی‌شدهٔ شبکهٔ آبیاری نکوآباد.
- دستهٔ دوم، بهره‌وری انرژی متوسط: تحت سناریوی بهره‌برداری نرمال، در ۲۳ واحد زراعی شاخص EP با محدودهٔ تغییرات ۰/۳۰۵–۰/۳۰۰۱ Kg/KWh در دستهٔ بهره‌وری انرژی متوسط قرار گرفت. تحت سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی، تنها در یک واحد زراعی شاخص EP با مقدار ۰/۳۰۰۵ Kg/KWh در دستهٔ بهره‌وری انرژی متوسط قرار گرفت.
- دستهٔ سوم – بهره‌وری انرژی پایین: تحت سناریوی بهره‌برداری نرمال، در ۴۳۶ واحد زراعی شاخص EP با محدودهٔ تغییرات ۰/۱۹–۰/۱۶ Kg/KWh در دستهٔ بهره‌وری انرژی پایین قرار گرفت. تحت سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی، به‌جز یک واحد زراعی که در دستهٔ متوسط قرار گرفته بود، سایر ۴۵۸ واحد دیگر با محدودهٔ تغییرات ۰/۰۶–۰/۰۳ Kg/KWh در دستهٔ بهره‌وری انرژی پایین قرار گرفت. در این ارتباط لازم به توضیح است همان‌طور که در نمودارهای شکل ۶ نیز مشهود است، به‌رغم اینکه اکثریت قریب‌به‌اتفاق واحدهای زراعی در هر دو سناریوی بهره‌برداری در دستهٔ بهره‌وری انرژی ضعیف قرار گرفته، با تشدید کم‌آبی در سناریوی بهره‌برداری دوم، کاهش چشمگیر EP در کل شبکهٔ آبیاری قابل ملاحظه است؛ به‌نحوی‌که میزان کاهش شاخص EP در محدودهٔ ۶۸/۴۲ تا ۸۱/۲۵ درصد بوده است. بنابراین، آسیب‌پذیری سامانهٔ

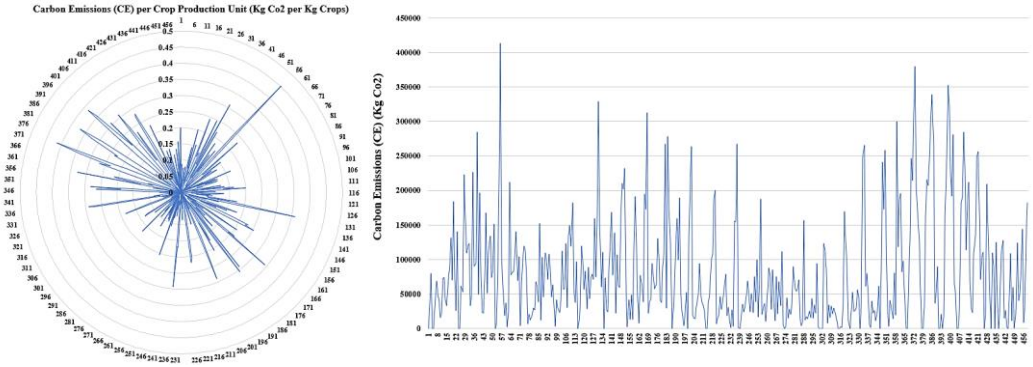
بهره‌برداری آب سطحی در مواجهه با کاهش تأمین آب در محل بند انحرافی، در قالب شاخص بهره‌وری انرژی نیز به‌وضوح قابل مشاهده و رصد است.



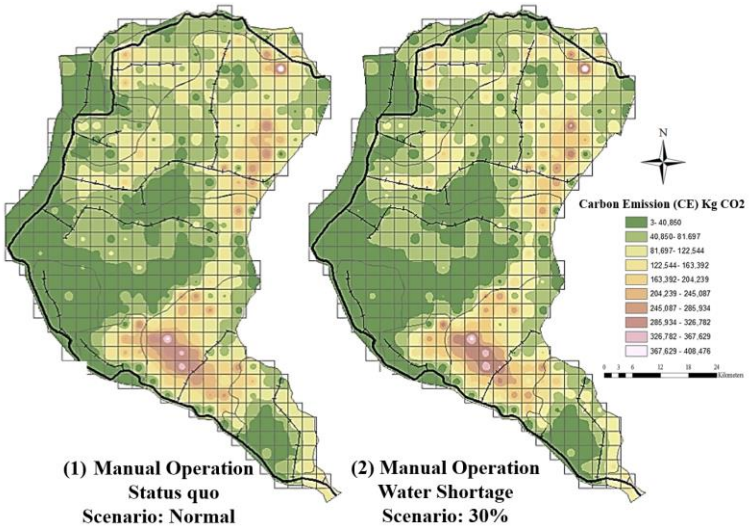
شکل ۶. مقادیر محاسبه‌شدهٔ شاخص بهره‌وری انرژی تحت دو سناریوی بهره‌برداری نرمال و کم‌آبی

شاخص تولید کربن

بررسی نتایج به‌دست‌آمده از شاخص انتشار CO_2 ـ مطابق شکل‌های ۷ و ۸ ـ حاکی از مقادیر بالاتر انتشار کربن مرتبط با تولید غذا در ۲۹۲ واحد زراعی از مجموع ۴۵۹ واحد زراعی است که نیاز به بهبود کارایی یا شیوه‌های جایگزین توزیع آب سطحی را در محدودهٔ این واحدها پیشنهاد می‌کنند. مقادیر پایین‌تر انتشار کربن به‌ترتیب در ۱۹ و ۴۴ واحد زراعی رخ داده است که به‌نوعی منعکس‌کنندهٔ شیوه‌های پایدارتری از توزیع آب سطحی در این واحدهای زراعی است.



شکل ۷. مقادیر کلی تولید کربن محاسبه‌شده به تفکیک واحدهای زراعی و همچنین مقادیر شاخص تولید کربن به‌ازای هر کیلوگرم محصول تولیدی



شکل ۸. نقشهٔ پهنه‌بندی شاخص تولید کربن تحت سناریوی نرمال و کم‌آبی در سطح شبکهٔ آبیاری نکوآباد

بحث

خلاصهٔ نتایج کمی شاخص‌های ارزیابی عملکرد پیوند آب–انرژی تحت سناریوهای نرمال و کم‌آبی در جدول ۱ ارائه و در ادامه تشریح شده است:

شاخص کفایت توزیع آب سطحی: نتایج نشان داد که تحت سناریوی نرمال، در اطراف کانال اصلی شاخص تحویل آب سطحی در بازهٔ ۶۰ تا ۸۰ درصد متغیر بوده که وضعیت بهتری نسبت به اطراف کانال‌های فرعی را دارد؛ شاخص مذکور در بازهٔ ۴۸ تا ۷۷ درصد متغیر بوده است. تحت سناریو کم‌آبی تقریباً حدود ۷۰ درصد شبکه شاخص تحویل آب سطحی زیر ۳۰ درصد است. می‌توان این‌طور استدلال نمود که توانایی سامانهٔ بهره‌برداری اپراتور–محور در توزیع کافی آب سطحی در سطح شبکهٔ آبیاری نکوآباد، حتی در شرایط نرمال بهره‌برداری یا شرایط خفیف کم‌آبی در سامانهٔ تأمین آب، عملکردی نامطمئن و غیرمؤثر نشان می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمدهٔ این شاخص در محدودهٔ به‌دست‌آمده در تحقیقات کاغذچی و همکاران (۱۳۹۹) و بیات و همکاران (۱۴۰۱) به دست آمده است.

شاخص بهره‌وری آب سطحی: با توجه به اینکه شاخص مذکور برای اولین‌بار در این تحقیق استفاده شده است، امکان مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده با تحقیقات قبلی وجود ندارد. خلاصهٔ بحث قابل ارائه در این قسمت محدود به تأیید عملکرد غیرقابل اطمینان سامانهٔ توزیع آب سطحی در شبکهٔ آبیاری نکوآباد است؛ به‌طوری‌که تحت سناریوی بهره‌برداری نرمال، در حدود ۷۸/۲ درصد از سطح شبکهٔ شاخص WP با محدودهٔ تغییرات ۰/۴۹–۰/۰۱ Kg/M^3 در دستهٔ بهره‌وری آب سطحی پایین قرار گرفت. تحت سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی نیز در حدود ۹۹/۷ درصد سطح شبکه با محدودهٔ تغییرات ۰/۴۴–۰/۰۱ Kg/M^3 در دستهٔ بهره‌وری آب سطحی پایین قرار گرفت.

شاخص بهره‌وری انرژی: مشابه نتایج قبلی، نتایج این شاخص نیز ضرورت ارتقای فوری سامانهٔ بهره‌برداری آب سطحی را تأیید کرد؛ به‌نحوی‌که تحت سناریوی بهره‌برداری نرمال، در حدود ۹۴ درصد از سطح شبکهٔ شاخص EP با محدودهٔ تغییرات ۰/۱۹– ۰/۱۶ Kg/KWh در دستهٔ بهره‌وری انرژی پایین قرار گرفت. تحت سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی نیز در حدود ۹۹/۷ درصد سطح شبکه EP با محدودهٔ تغییرات ۰/۰۶–۰/۰۳ Kg/KWh در دستهٔ بهره‌وری انرژی پایین قرار گرفت. لازم به توضیح است در این پژوهش شاخص محدود به بخش مدیریت آب کشاورزی در قالب راندمان مصرف انرژی سامانه‌های مرتبط با مدیریت آب کشاورزی (از بند انحرافی تا محل مزرعه) در تولید سود ناشی از فعالیت کشاورزی (به عبارت کلی‌تر خروجی اقتصادی) خلاصه می‌شود. بنابراین اگر محدودیت خارج از مزرعه بودن در فرایند ارزیابی مذکور برداشته شود، راندمان مصرف انرژی مرتبط با سایر فعالیت‌های مرتبط با کاشت، داشت و برداشت نیز در نظر گرفته می‌شود. بااین‌حال، همان‌طور که پیش‌تر نیز توضیح داده شد، حوزهٔ این تحقیق مرتبط با ارزیابی عملکرد سامانه‌های انتقال، توزیع و تحویل آب کشاورزی و نیز برداشت آب زیرزمینی می‌باشد و فرض شده است که سایر فعالیت‌های کشاورزی محدود به مزرعه، ثابت و بدون تغییر در نظر گرفته شده است. تحلیل مکانی مصرف انرژی در سطح شبکهٔ آبیاری نشان داد که حدود ۱۳ درصد چاه‌های فعال در منطقه، آب را از عمقی بیشتر از ۱۲۰ متر پمپاژ می‌کنند که رقم قابل تأملی است. در بسیاری از مطالعات انجام‌شده در این زمینه، چاه‌هایی با عمق بیشتر از ۹۰ متر به‌عنوان چاه‌های عمیق شناخته می‌شوند. با این احتساب، در حدود ۲۵/۸۸ درصد عمقی بیشتر از ۹۰ متر دارند که در حدود ۶۵ درصد کل مصرف آب کشاورزی این شبکه را تأمین می‌کنند. این درحالی است که چاه‌های کم‌عمق، با حداکثر ۶۰ متر عمق، درمجموع حدود ۱۷ درصد کل مصرف کشاورزی منطقه را تأمین می‌کنند.

شاخص مصرف انرژی و تولید کربن: بررسی نتایج به‌دست‌آمده از این شاخص‌ها حاکی از مقادیر بالاتر تولید انرژی و انتشار کربن مرتبط با تولید غذا حدود ۶۳ درصد اراضی شبکه است که نیاز به بهبود کارایی یا شیوه‌های جایگزین توزیع آب سطحی را در محدودهٔ این واحدها پیشنهاد می‌کنند. همچنین نتایج تحلیل مکانی نشان داد که ارتباط معناداری در مناطق دارای شاخص کفایت بهره‌وری آب سطحی مطلوب‌تر، حدود ۹/۵ درصد سطح شبکه، با مناطق دارای مصرف انرژی و انتشار کربن کمتر دیده می‌شود. روند تغییرات این دو شاخص با نتایج دو تحقیق مرتبط انجام‌شده در شبکهٔ آبیاری رودشت توسط کامرانی و همکاران (۱۳۹۹) و بیات و همکاران (۱۴۰۱) مطابقت دارد.

جدول ۱. چکیدهٔ نتایج کمی شاخص‌های ارزیابی عملکرد پیوند آب–انرژی تحت سناریوهای نرمال و کم‌آبی

سناریو	شاخص‌ها	تحویل آب سطحی			مصرف انرژی			بهره‌وری آب سطحی			بهره‌وری انرژی		
	کیفی	خوب	متوسط	بد	بالا	متوسط	پایین	خوب	متوسط	بد	بالا	متوسط	پایین
سناریوی نرمال	تعداد واحد	۱۶	۲۸	۴۱۵	۳۴۷	۶۸	۴۴	۴۳	۶۶	۳۵۰	–	۲۳	۴۳۶
	درصد	۳/۴۸	۶/۱۱	۹۰/۴۱	۷۵/۵۹	۱۴/۸۱	۹/۵۸	۹/۳۶	۱۴/۳۷	۷۶/۲۵	–	۴/۰۱	۹۴/۹۸
سناریوی کم‌آبی	تعداد واحد	۴	۱۷	۴۳۸	۳۹۷	۳۹	۲۳	۳	۱۷	۴۳۹	–	۱	۴۵۸
	درصد	۰/۸۷	۳/۷۱	۹۵/۴۲	۸۶/۴۹	۸/۴۹	۵/۰۱	۰/۶۵	۳/۷	۹۵/۶۴	–	۰/۲۱	۹۹/۷۸

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این مطالعه به ارزیابی فرایند توزیع آب سطحی در شبکهٔ آبیاری نکوآباد اصفهان پرداخت. برخلاف شیوهٔ ارزیابی فنی رایج در ارزیابی عملکرد سامانه‌های بهره‌برداری که عمدتاً مبتنی‌بر به‌کارگیری شاخص‌های فنی ارزیابی است، در این تحقیق از شاخص‌های پراستفاده در مطالعات مبتنی‌بر پیوند آب–غذا–انرژی استفاده شد. نکتهٔ حائز اهمیت در این پژوهش، بومی‌سازی شاخص‌های مذکور برای به‌کارگیری در ارزیابی سامانهٔ بهره‌برداری در شبکهٔ آبیاری است. به‌کارگیری شاخص‌های مذکور (براساس روابط معرفی‌شده در مطالعات پیشین، امکان ارزیابی مستقل سهم آب سطحی در فرایند تولید غذا و به تبع آن ارزیابی عملکرد فرایند توزیع آب سطحی بین حقابه‌بران در سطح یک شبکهٔ آبیاری را مهیا نمی‌کند. دلیل این امر، عدم تمایز میزان مشارکت منابع مختلف آب سطحی و زیرزمینی در فرایند تولید غذا در محدوده‌های زراعی مختلف است. اهمیت این تمایزسازی سهم منابع مختلف آب در فرایند کشاورزی، در پررنگ نمودن عملکرد سامانهٔ بهره‌برداری در توزیع پایدار، قابل اعتماد و کافی آب سطحی بین حقابه‌بران است. تحلیل زمانی–مکانی نتایج شبیه‌سازی وضعیت توزیع آب سطحی در قالب تمام شاخص‌های بررسی‌شده در این تحقیق نشان داد که نه‌تنها در وضعیت بهره‌برداری نرمال وضعیت قابل قبولی نبوده، بلکه این وضعیت با تشدید کم‌آبی به‌طورکل غیرقابل اعتماد ارزیابی می‌شود. بنابراین با استناد به نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق، می‌توان با قطعیت عملکرد سامانهٔ بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری نکوآباد را زیر سؤال برد و توزیع آب سطحی بین حقابه‌بردان را نامطلوب تلقی نمود. بنابراین توسعهٔ سامانه‌های مدرن بهره‌برداری شامل سامانه‌های کنترل خودکار یا به‌صورت کلی از مدار خارج نمودن کانال‌های روباز انتقال و توزیع آب سطحی و جایگزینی آن با شبکهٔ لوله‌های انتقال به‌عنوان گزینه‌های مدرن‌سازی شبکه‌های آبیاری پیشنهاد می‌گردد. به‌کارگیری شاخص‌های بومی‌سازی‌شده در این تحقیق، می‌تواند بستری را برای ارزیابی دقیق گزینه‌های خوکارسازی، نوسازی، بهسازی و مدرن‌سازی سامانه‌های توزیع آب سطحی در شبکه‌های آبیاری فراهم آورد.

References

Allam, M. M., & Eltahir, E. A. (2019). Water-energy-food nexus sustainability in the Upper Blue Nile (UBN) Basin. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 5.

Bayat, F., Roozbahani, A., & Hashemy Shahdany, S. M. (2022). Performance evaluation of agricultural surface water distribution systems based on water-food-energy nexus and using AHP-Entropy-WASPAS technique. *Water Resources Management*, 36(12), 4697-4720.

Campana, P. E., Zhang, J., Yao, T., Andersson, S., Landelius, T., Melton, F., & Yan, J. (2018). Managing agricultural drought in Sweden using a novel spatially-explicit model from the perspective of water-food-energy nexus. *Journal of Cleaner Production*, 197, 1382-1393.

Culas, R. J., & Baig, I. A. (2020). Impacts of irrigation water user allocations on water quality and crop productivity: The LCC irrigation system in Pakistan. *Irrigation and Drainage*, 69(1), 38-51.

Dejen, Z.A. (2015). *Hydraulic and operational performance of irrigation schemes in view of water saving and sustainability: sugar estates and community managed schemes In Ethiopia*. Wageningen University and Research.

Del Borghi, A., Tacchino, V., Moreschi, L., Matarazzo, A., Gallo, M., & Vazquez, D. A. (2022). Environmental assessment of vegetable crops towards the water-energy-food nexus: A combination of precision agriculture and life cycle assessment. *Ecological Indicators*, 140, 109015.

El-Gafy, I. (2017). Water–food–energy nexus index: analysis of water–energy–food nexus of crop's production system applying the indicators approach. *Applied Water Science*, 7(6), 2857-2868.

Fabiani, S., Vanino, S., Napoli, R., & Nino, P. (2020). Water energy food nexus approach for sustainability assessment at farm level: An experience from an intensive agricultural area in central Italy. *Environmental Science & Policy*, 104, 1-12.

Gómez-Limón, J. A., Gutiérrez-Martín, C., & Montilla-López, N. M. (2021). Priority water rights. Are they useful for improving water-use efficiency at the irrigation district level?. *Agricultural Water Management*, 257, 107145.

Kaghazchi, A., Shahdany, S. M. H., & Roozbahani, A. (2021). Simulation and evaluation of agricultural water distribution and delivery systems with a Hybrid Bayesian network model. *Agricultural Water Management*, 245, 106578.

Kamrani, K., Roozbahani, A., & Shahdany, S. M. H. (2020). Using Bayesian networks to evaluate how agricultural water distribution systems handle the water-food-energy nexus. *Agricultural Water Management*, 239, 106265.

Karanisa, T., Achour, Y., Ouammi, A., & Sayadi, S. (2022). Smart greenhouses as the path towards precision agriculture in the food-energy and water nexus: Case study of Qatar. *Environment Systems and Decisions*, 42(4), 521-546.

Karimi, P., Qureshi, A. S., Bahramloo, R., & Molden, D. (2012). Reducing carbon emissions through improved irrigation and groundwater management: A case study from Iran. *Agricultural water management*, 108, 52-60.

Liu, C., Zhang, Z., Liu, S., Liu, Q., Feng, B., & Tanzer, J. (2019). Evaluating agricultural sustainability based on the water–energy–food nexus in the Chenmengquan irrigation district of China. *Sustainability*, 11(19), 5350.

McGrane, S. J., Acuto, M., Artioli, F., Chen, P. Y., Comber, R., Cottee, J., ... & Yan, X. (2019). Scaling the nexus: Towards integrated frameworks for analysing water, energy and food. *The Geographical Journal*, 185(4), 419-431.

Namany, S., Al-Ansari, T., & Govindan, R. (2019). Optimisation of the energy, water, and food nexus for food security scenarios. *Computers & Chemical Engineering*, 129, 106513.

Parihar, C. M., Meena, B. R., Nayak, H. S., Patra, K., Sena, D. R., Singh, R., ... & Abdallah, A. M. (2022). Co-implementation of precision nutrient management in long-term conservation agriculture-based systems: A step towards sustainable energy-water-food nexus. *Energy*, 254, 124243.

Sharu, E. H., & Ab Razak, M. S. (2020). Hydraulic performance and modelling of pressurized drip irrigation system. *Water*, 12(8), 2295.

Siciliano, G., Rulli, M. C., & D'odorico, P. (2017). European large-scale farmland investments and the land-water-energy-food nexus. *Advances in water resources*, 110, 579-590.

Soler, J., Gamazo, P., Rodellar, J., & Gómez, M. (2015). Operation of an irrigation canal by means of the passive canal control. *Irrigation science*, 33, 95-106.